气象干旱变化特征及其对粮食产量的影响
——以甘肃武威市为例

丁文魁[1,2]， 李兴宇[1]， 杨晓玲[1]， 马中华[1]， 李岩瑛[1]
（1. 甘肃省武威市气象局，甘肃 武威 733099；2. 中国气象局兰州干旱气象研究所，甘肃 兰州 730020）

摘 要：干旱是甘肃武威市致灾最严重灾害天气。利用甘肃武威市1960—2019年降水资料和1970—2019年粮食产量资料，运用统计学方法分析了武威市气象干旱和粮食产量的变化特征以及干旱与粮食产量的关系。结果表明：(1) 春旱、春末夏初旱、伏旱频数的空间变化比较一致，均为北部荒漠区多于绿洲平原区，绿洲平原区多于南部山区。(2) 春旱、夏初旱和伏旱年代频数变化不一致，春旱凉州、民勤呈增加趋势，古浪、天祝及全市呈减少趋势；夏初旱凉州、古浪无变化，民勤、天祝及全市呈减少趋势；伏旱凉州无变化，民勤、古浪呈减少趋势，天祝及全市呈增加趋势；随干旱等级的加重各类干旱频数总体上呈增加趋势。(3) 粮食产量(小麦、玉米和总粮食)随年和年代呈显著增加趋势，气象产量的年变化没有明显的规律性，波动性较大；气象产量年代变化呈先增加后减少再增加趋势。气象产量与各类干旱年代频数基本表现为负相关，气象产量与夏初旱频数的相关性水平显著，与其他干旱相关性均不显著。

关键词：干旱灾害；变化特征；粮食产量；武威市

干旱作为全球最严重、最复杂的自然灾害，对生态环境、农业生产、粮食安全、经济发展及社会稳定均已产生了严重影响。据测算，每年因干旱灾害全球经济损失高达60~80亿美元，远远超过了其他气象灾害，被认为是第一气象灾害[1]。我国作为世界第一人口大国和农业大国，干旱半干旱面积约占整个国土面积的1/3，每年遭受各种自然灾害的农田面积和粮食作物减产损失中，干旱占一半以上[2-5]；王春乙[6]研究指出中国每年平均旱灾的受灾面积高达$2.20×10^7$ hm^2，占各种灾害受灾面积的40%以上，粮食损失约$1.20×10^{10}$ kg；赵海燕等[7]分析认为，东北、内蒙古和西北地区的农业干旱有显著加重趋势；李吉顺和赵建军[8-9]等研究发现，无论受灾面积还是在成灾面积，旱灾均占各类灾害全部的50%~60%，特别是对干旱的北方来说，未来农业发展所面临的干旱危机将更为严峻。因此，水资源紧缺、干旱化严重是制约我国农业生产的主要因素之一。

武威市是甘肃省的主要粮食产区，也是自然灾害频发的农业区域，研究表明，干旱是武威市的第一致灾气象灾害，经统计，1960—2019年武威市干旱发生频率：春旱在20%~70%、春末夏初旱在13%~58%、伏旱在25%~85%[10]，且具有持续时间长、影响范围广特点[11]，频繁造成大面积粮食减产，几乎每年都有不同程度干旱灾害损失，年均农业受灾面积超过$3.16×10^4$ hm^2，年均经济损失超过$5.46×10^7$元[12-13]，鉴于此，本文分析了近60 a武威市干旱时空变化以及干旱等级的变化特征，进一步探讨了干旱对粮食产量的影响，将为与农业相关部门提高干旱业务服务能力、政府部门防旱抗旱和水资源的科学利用提供参考依据，对农业的可持续发展有重要意义。

1 研究区概况与资料方法

1.1 研究区概况

武威市位于甘肃省河西走廊东段，南依祁连

收稿日期：2021-05-26； **修订日期：**2021-11-17
基金项目：甘肃省气象局第八批“十人计划”；干旱气象科学基金项目“石羊河流域高影响灾害天气气候特征及形成机理分析研究”(IAM 202016)和国家自然科学基金项目(41975015)共同资助
作者简介：丁文魁(1970-)，男，高级工程师，主要从事农业气象与生态试验研究工作. E-mail: wwqxj.6150343@163.com
通讯作者：杨晓玲. E-mail:：wwqxj6150343@163.com

山,北靠内蒙古,东南与兰州市和白银市接壤,西北与张掖市和永昌县毗邻,辖凉州区、民勤县、古浪县和天祝藏族自治县。地处黄土、蒙新、青藏三大高原的交汇地带,地势南高北低,海拔高度在1300~3100 m(图1a),自西南向东北倾斜,依次形成南部祁连山区集水区(古浪、天祝),中部绿洲山前冲积平原川区(凉州)和北部荒漠区(民勤)三大地貌景观。由于武威市地处西北内陆,属于典型的温带大陆性干旱气候,降水先天不足,蒸发非常强烈,年降水量在110~410 mm,年蒸发量在1500~2700 mm,蒸发与降水的比在3.7~24.5倍,干旱的发生具有必然性,对农业生产的影响极大,影响社会经济稳定发展[11-12]。

1.2 资料来源与统计标准

降水资料来源于武威市的民勤、凉州、古浪、天祝的乌鞘岭4个气象站,时段为1960—2019年。武

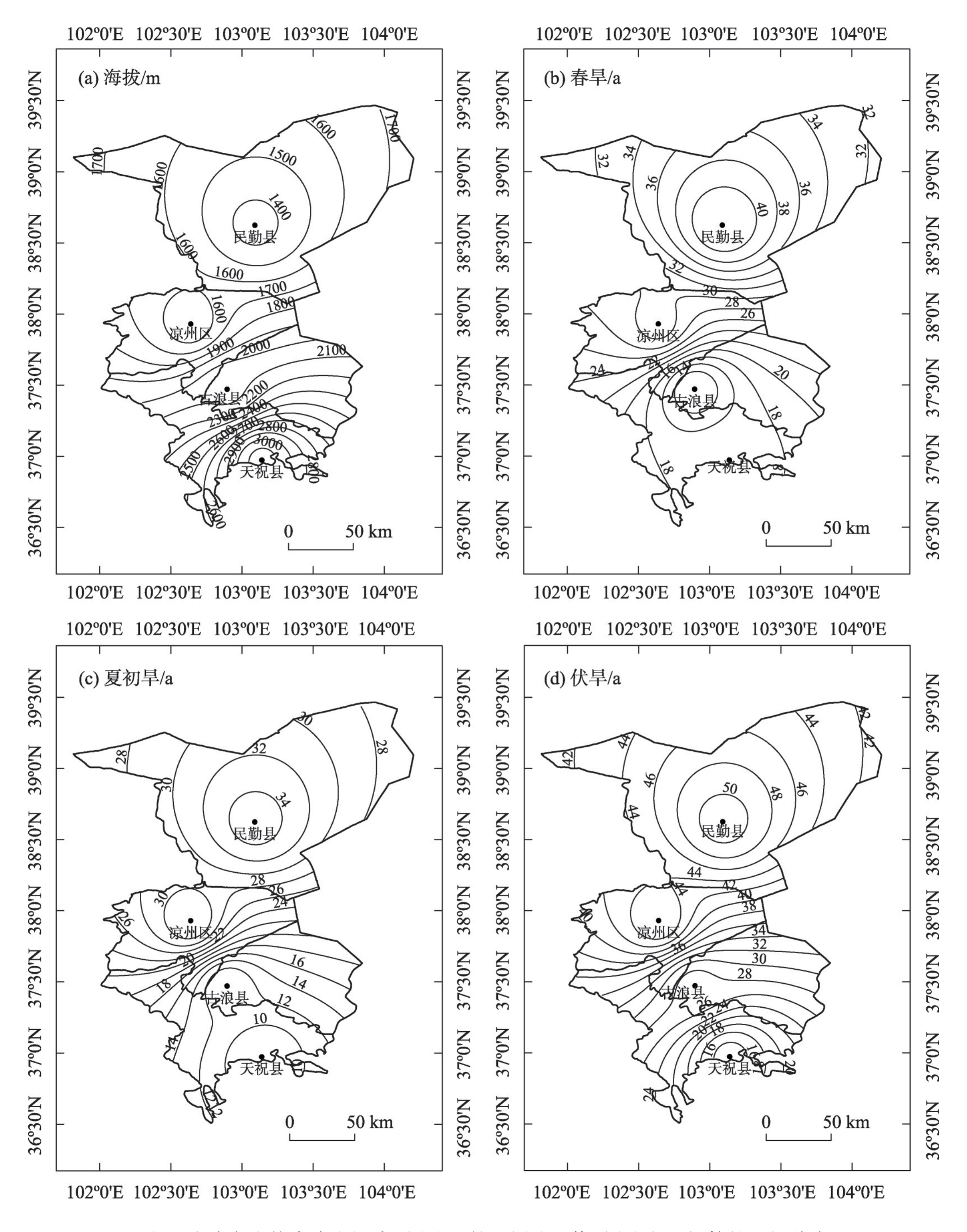


图1 武威市海拔高度(a)、春旱(b)、夏初旱(c)和伏旱(d)出现频数的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of altitude above sea level (a) and years of spring (b) early summer (c) and midsummer (d) drought in Weiwei City

威市是以春小麦和玉米为主、豆类等作物为副的主要粮食产区，因此选取了小麦、玉米及总粮食产量为研究对象，粮食产量(实际粮食产量)来源于武威市统计局，粮食产量是指单位面积上的产量，单位 $kg\cdot hm^{-2}$，时段为1970—2019年。各要素的连续性和完整性好，可信度高，可以满足本研究的需要。

气象干旱是某时段蒸发量和降水量的收支不平衡，水分支出大于水分收入而造成的水分短缺现象。根据中国气象局和甘肃省气象局制定的气候干旱标准结合本地实际情况，将气象干旱划分为春旱、春末夏初旱(以下简称初夏旱)、伏旱3大类，以旬降水距平百分率($\Delta R\%$)和旱段的长短确定气象干旱的标准，其中春旱是指4—5月间连续2旬以上 $\Delta R\% < 0\%$，旱段≥35 d；初夏旱是指5—6月间连续2旬以上 $\Delta R\% < 0\%$，旱段≥35 d；伏旱是指7月中旬至8月中旬有一旬 $\Delta R\% < 0\%$，旱段(2场好雨的间隔日数)≥15 d。一年中只要出现春旱或初夏旱或伏旱确定为一个春旱年或初夏旱年或伏旱年，3类干旱同时出现时，应分别统计。根据中华人民共和国国家质检总局和国家标准委2017年批准发布的GB/T 20581—2007《气象干旱等级》，将干旱分为轻旱($-10\% < \Delta R\% < 0\%$)、中旱($-30\% < \Delta R\% \leq -10\%$)、重旱($-50\% < \Delta R\% \leq -30\%$)、特旱($\Delta R\% \leq -50\%$)4个等级。

1.3 研究方法

以干旱标准分别统计出1960—2019年春旱、初夏旱、伏旱出现年数(用频数表述)。

1.3.1 气象产量分离 在长时间序列作物产量与气象因子关系的统计研究中，一般把作物产量分解为趋势产量、气象产量和噪音项[14-15]，公式为：

$$y_i = y_{ti} + y_{wi} + \Delta y\ , \quad i = 1,2,3,\cdots,n \tag{1}$$

式中：y_i 为总产量；y_{ti} 为趋势产量；y_{wi} 为气象产量；Δy 噪音项。趋势产量是作物在正常天气条件下，农业技术措施随时间不断改善的基本产量特征，代表气象变化之外的所有自然和非自然因素对产量的影响，其变化有一定规律，可认为是粮食产量的稳定增长因素。气象产量代表气象因素对产量的影响，包括某些气象灾害，特别是干旱灾害的影响，在粮食产量年际丰欠变化中起着重要的作用。将实际产量减去趋势产量，得出变化较大的自然因子(即气象因子)对粮食产量的影响，称为气象产量。

采用5 a滑动平均方法模拟趋势产量[14]，公式为：

$$\bar{y}_{ti} = (y_{i-2} + y_{i-1} + y_i + y_{i+1} + y_{i+2})/5, \quad i = 1,2,3,\cdots,n \tag{2}$$

即气象产量公式为：

$$y_{wi} = y_i - \bar{y}_{ti}, \quad i = 1,2,3,\cdots,n \tag{3}$$

1.3.2 线性趋势系数 采用线性趋势系数方法[16]分析干旱频数、粮食和气象产量随时间的变化趋势，计算各要素的气候倾向率，线性回归方程为：

$$x_i = a + bt_i, \quad i = 1,2,3,\cdots,n \tag{4}$$

式中：x_i 为要素；t_i 为 x_i 所对应的时间；b 为线性倾向率。变化趋势的显著性，利用时间与序列变量之间的相关系数 R 即气候趋势系数进行检验。根据蒙特卡罗模拟方法[17]：通过信度 α=0.1、0.05、0.01显著性检验所对应的气候趋势系数临界值，依次为：0.3058、0.3653、0.4430，气候趋势系数绝对值大于上述临界值时，分别认为气候趋势系数较显著、显著、极显著。

运用Pearson相关系数法[18]和气候趋势法[16]分析干旱对气象产量的影响程度。

2 结果与分析

2.1 干旱变化特征

2.1.1 空间分布 武威市各地各类干旱的地域分布差异不大。春旱出现频数(图1b)：民勤最多42 a、70.0%，凉州次之31 a、51.7%，再次为天祝17 a、28.3%，古浪最少12 a、20.0%，全市平均为26 a、42.5%。夏初旱出现频数(图1c)：民勤最多35 a、58.3%，凉州次之32 a、53.3%，再次为古浪10 a、16.7%，天祝最少8 a、13.3%，全市平均为21 a、35.4%。伏旱出现频数(图1d)：民勤最多51 a、85.0%，凉州次之46 a、76.7%，再次为古浪27 a、45.0%，天祝最少15 a、25.0%，全市平均为35 a、57.9%。即3类干旱的空间变化比较一致，均为北部荒漠区多于绿洲平原区，绿洲平原区多于南部山区。

由图1可知，武威市3类干旱的空间分布与海拔高度密切相关，干旱频数随海拔高度的增加而减少，相关系数春旱达-0.734、夏初旱-0.880、伏旱-0.967，均通过了 α=0.001的显著性水平检验；其次，干旱的分布与地形地貌有一定的关系，由于南部山区处于祁连山东北侧的迎风坡，受地形抬升的影响，易出现降水，干旱频数较少，中北部由于地势

平坦,无明显的抬升作用,不易出现降水,干旱频数较多;再次,干旱的分布还与影响武威市的天气系统有关,南部山区位于祁连山东北侧,受西南季风影响明显,加之高原本身的热力、动力抬升等作用,致使这一带低涡、切变活动频繁,西南暖湿气流活跃,大气携带的水汽相对较多,降水也较多,干旱频数较少,平原区和荒漠区主要受西风带环流系统影响,大气携带的水汽相对较少,造成降水也较少,干旱频数较多;因此,形成了武威市干旱频数北部荒漠区多于中绿洲平原区多于南部山区的状况,即海拔高度、地形地貌和天气系统影响了武威市干旱的空间分布。

2.1.2　时间变化　武威市各地春旱、夏初旱和伏旱频数变化的偶然性较大,有的年份未出现,因此,在时间变化上选取年代际进行分析。

由表1可知,武威市春旱、夏初旱和伏旱年代频数变化不太一致。春旱频数20世纪80年代最多,全市5.0 a、各地在2~8 a;60年代次之,全市4.8 a、各地在3~6 a;再次21世纪00—10年代,全市分别为4.5 a、4.3 a,各地在2~7 a、1~9 a;20世纪70年代和90年代最少,全市均为3.5 a,各地分别在2~7 a、1~7 a。夏初旱频数20世纪60年代最多,全市4.5 a、各地在2~8 a;70年代和21世纪00年代次之,全市均为4 a,各地分别在2~6 a、1~6 a;再次21世纪10年代,全市3.5 a、各地在1~6 a;20世纪90年代全市为3 a,各地在1~5 a;20世纪80年代最少,全市2.3 a、各地在1~4 a。伏旱频数20世纪80年代最多,全市6.8 a、各地在1~10 a;21世纪10年代和20世纪70年代次之,全市分别为6.5 a、6.3 a,各地均在4~9 a;再次21世纪00年代,全市5.8 a、各地在3~9 a;20世纪60年代最少,全市为5 a,各地在1~9 a;20世纪90年代最少,全市4.5 a、各地在1~8 a。

由表2可知,春旱频数凉州、民勤线性倾向率为正,呈增加趋势;古浪、天祝及全市线性倾向率为负,呈减少趋势;气候趋势系数民勤、古浪、天祝通过了α=0.01的显著性水平检验,民勤增加极显著,古浪、天祝减少很显著;夏初旱频数凉州、古浪线性倾向率为0,无变化,民勤、天祝及全市线性倾向率为负,呈减少趋势,气候趋势系数民勤通过了α=0.1的显著性水平检验,减少较显著,天祝通过了α=0.01的显著性水平检验,减少极显著;伏旱频数凉州线性倾向率为0,无变化,民勤、古浪线性倾向率为负,呈减少趋势,天祝及全市的线性倾向率为正,呈增加趋势,气候趋势系数天祝通过了α=0.01的显著性水平检验,增加极显著。由此可知,各地各类干旱的变化趋势很不一致,这可能是由于武威市处于不

表1　武威市春旱、夏初旱和伏旱各年代频数

Tab. 1　Age frequency of spring and early summer and midsummer drought in Wuwei City

年代	春旱/a					夏初旱/a						伏旱/a			
	凉州	民勤	古浪	天祝	全市	凉州	民勤	古浪	天祝	全市	凉州	民勤	古浪	天祝	全市
1960	5	6	3	5	4.8	6	8	2	2	4.5	7	9	3	1	5
1970	2	7	3	2	3.5	6	6	2	2	4	9	7	5	4	6.3
1980	8	7	2	3	5	4	4	0	1	2.3	9	10	7	1	6.8
1990	4	7	1	2	3.5	4	5	2	1	3	5	8	4	1	4.5
2000	7	6	2	3	4.5	6	6	3	1	4	7	9	4	3	5.8
2010	5	9	1	2	4.3	6	6	1	1	3.5	9	8	4	5	6.5

表2　武威市春旱、夏初旱和伏旱的线性倾向率和趋势系数

Tab. 2　Linear tendency rates and trend coefficient of spring and early summer and midsummer drought in Wuwei City

地名	春旱		夏初旱		伏旱	
	倾向率/[a·(10a)$^{-1}$]	趋势系数	倾向率/[a·(10a)$^{-1}$]	趋势系数	倾向率/[a·(10a)$^{-1}$]	趋势系数
凉州	0.314	0.275	0.000	0.000	0.000	0.000
民勤	0.343	0.586***	−0.257	−0.362*	−0.029	−0.051
古浪	−0.400	−0.837***	0.000	0.000	−0.029	−0.039
天祝	−0.371	−0.594***	−0.229	−0.828***	0.486	0.516***
全市	−0.029	−0.084	−0.121	−0.280	0.107	0.226

注:*、**、***表示通过了0.1、0.05、0.01显著性水平检验。下同。

同气候区的交汇过渡带,天气特征和气候变化受到季风、环流系统、地形及海拔等因素的影响,局地气候变化比较复杂,有待进一步研究。

2.1.3 各等级干旱变化 由表3可知,武威市各地春旱、夏初旱和伏旱的各等级频数变率较大,且变化很不一致,没有一定的规律性。从全市来看,各类干旱频数随干旱等级的加重总体上呈增加趋势,其中,春旱特旱频数最多、轻旱频数次之;夏初旱特旱频数最多,重旱频数次之;伏旱中旱频数最多,特旱频数次之。武威市特旱和重旱频数的增加,将会给农业生产和人民生活带来了严重的影响[19-20]。

2.2 粮食产量变化特征

武威市年粮食产量呈波动性增加趋势(图2a);年气象产量的波动性较大(图2b),没有明显的变化规律。线性趋势系数法计算年粮食产量和气象产量的线性倾向率及趋势系数(表4),粮食产量线性倾向率为:玉米>总粮食>小麦,即玉米产量增加趋势最明显;气象产量线性倾向率为:小麦>玉米>总粮食,即小麦产量增加趋势最明显,总粮食为弱的减少趋势。根据蒙特卡罗模拟方法规定,粮食产量小麦、玉米及总产量的趋势系数均通过了$\alpha=0.01$的显著性水平检验,增加趋势极显著;气象产量小麦、

表3 武威市春旱、夏初旱和伏旱各等级频数

Tab. 3 All levels frequency of spring, early summer and midsummer drought in Wuwei City

等级	春旱/a					夏初旱/a					伏旱/a				
	凉州	民勤	古浪	天祝	全市	凉州	民勤	古浪	天祝	全市	凉州	民勤	古浪	天祝	全市
轻旱	7	18	2	1	7.0	4	11	2	1	4.5	11	15	6	3	8.8
中旱	8	2	2	6	4.5	10	5	0	3	4.5	13	13	6	6	9.5
重旱	11	4	5	7	6.8	9	7	2	3	5.3	9	9	10	1	7.3
特旱	5	18	3	3	7.3	9	12	6	1	7.0	13	14	5	5	9.3

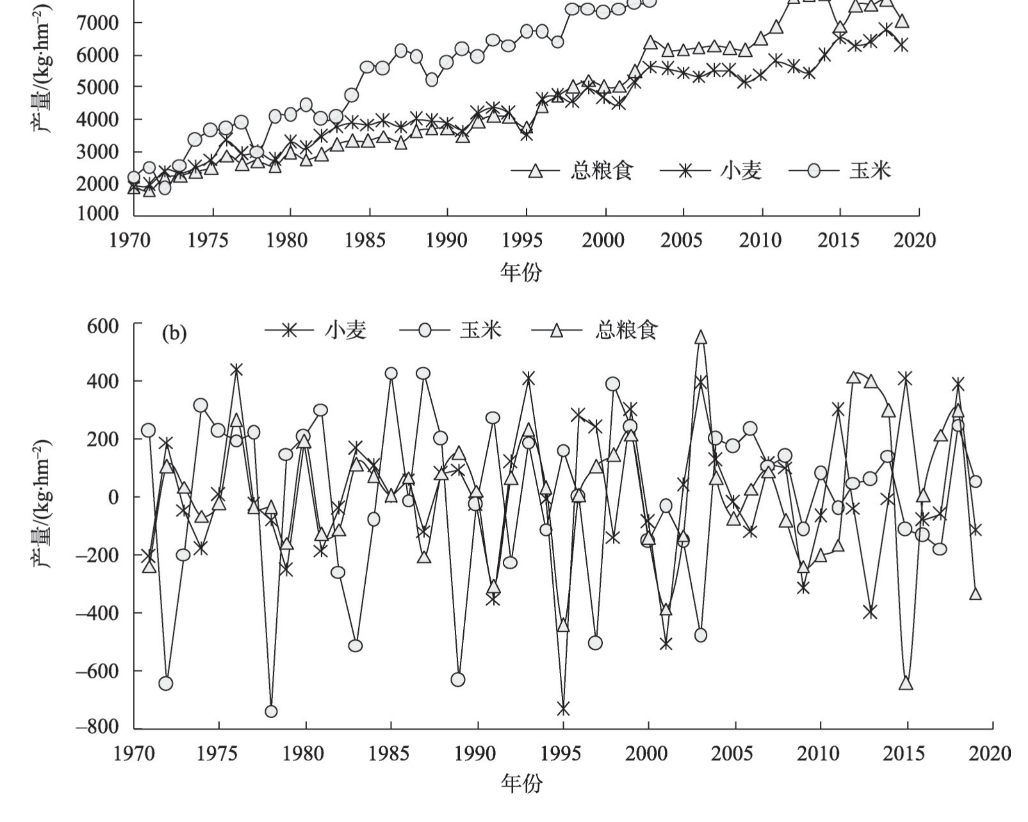


图2 武威市粮食产量(a)和气象产量(b)的年变化

Fig. 2 Annual changes of grain (a) and meteorological (b) yields in Wuwei City

表4 武威市粮食产量和气象产量均值、线性倾向率和趋势系数

Tab. 4 Mean value and linear tendency rates and trend coefficient of annual grain and meteorological yields in Wuwei City

	粮食产量			气象产量		
	小麦	玉米	总粮食	小麦	玉米	总粮食
均值/(kg·hm^{-2})	4333.08	6587.28	4603.8	3.75	1.92	−0.28
倾向率/[kg·hm^{-2}·(10a)$^{-1}$]	856.54	1723.1	1256.5	6.13	8.67	5.34
趋势系数	0.974***	0.977***	0.978***	0.036	0.044	0.033

玉米及总产量的趋势系数均没有通过显著性水平检验,增加或减少趋势不显著。

由表5可知,武威市粮食产量小麦、玉米及总产量呈逐年代增加,20世纪70年代到21世纪10年代小麦、玉米和总产量产量分别增加了3471.72 kg·hm^{-2}、5991.71 kg·hm^{-2}、4640.97 kg·hm^{-2}。粮食产量极值出现的年份相对一致,极大值小麦为6735 kg·hm^{-2}(2017年)、玉米为9961.5 kg·hm^{-2}(2008年)、总粮食为7860.6 kg·hm^{-2}(2014年),均出现在21世纪前20 a;极小值小麦为1896 kg·hm^{-2}(1970年)、玉米为1818 kg·hm^{-2}(1972年)、总粮食为1765.5 kg·hm^{-2}(1971年),均出现在20世纪70年代初期。武威市气象产量小麦、玉米及总产量呈随年代先增加再减少、然后再增加,20世纪70年代到21世纪10年代小麦、玉米和总产量产量分别增加了49.71 kg·hm^{-2}、45.49 kg·hm^{-2}、46.17 kg·hm^{-2}。气象产量极值出现的年份很不一致,极大值小麦为438.00 kg·hm^{-2}(1976年)、玉米为426.30 kg·hm^{-2}(1985年)、总粮食为547.20 kg·hm^{-2}(2003年);极小值小麦为−736.80 kg·hm^{-2}(1995年)、玉米为−740.10 kg·hm^{-2}(1978年)、总粮食为−646.49 kg·hm^{-2}(2015年)。

2.3 干旱对粮食产量的影响

为了进一步了解武威市干旱对农业生产的影响,从粮食产量分离出气象产量,并选取中旱及以上(由于轻旱对农业生产的影响小)等级干旱频数,分析干旱对气象产量的影响。

Pearson相关分析表明:武威市各类干旱频数和各气象产量基本表现为负相关(春旱与玉米、伏旱与小麦呈弱正相关)(表6),其中,夏初旱与小麦的相关系数通过了α=0.01显著性水平检验,相关性极显著,与玉米和总粮食的相关系数通过了α=0.05显著性水平检验,相关性显著,与其他相关系数均未通过显著性水平检验,相关性不显著。各类干旱对气象产量的影响也不尽相同,春旱对总产量影响最大,对玉米影响次之;夏初旱对小麦影响最大,对总产量影响次之;伏旱对玉米影响最大,对小麦影响次之。

气候趋势法分析发现(表6):春旱每增加1 a,小

表5 武威市粮食产量和气象产量逐年代距平

Tab. 5 Age anomaly of grain and meteorological yields in Wuwei City

年代	粮食产量/(kg·hm^{-2})			气象产量/(kg·hm^{-2})		
	小麦	玉米	总粮食	小麦	玉米	总粮食
1970	−1782.93	−3419.23	−2186.90	−23.58	−33.56	−19.34
1980	−669.18	−1523.98	−1298.00	29.06	2.45	21.76
1990	−105.33	36.62	−318.50	2.33	33.17	4.96
2000	868.66	2334.09	1349.35	−33.94	−13.99	−34.22
2010	1688.79	2572.48	2454.07	26.13	11.93	26.83

表6 武威市年代干旱频数和气象产量的的关系

Tab. 6 Relationship between age drought frequency and meteorological production in Wuwei City

	春旱		夏初旱		伏旱	
	相关系数	关系式	相关系数	关系式	相关系数	关系式
小麦	−0.058	y=−1.74x+8.33	−0.894***	y=−26.93x+74.64	0.072	y=1.49x−3.27
玉米	0.064	y=1.72x−3.74	−0.802**	y=−21.52x+62.81	−0.621	y=−11.35x+51.16
总粮食	−0.162	y=−4.51x+12.40	−0.862**	y=−23.96x+62.81	−0.023	y=−0.44x+2.29

麦、玉米、总粮食气象产量分别减少1.47 kg·hm^{-2}、−1.72 kg·hm^{-2}、4.51 kg·hm^{-2}；夏初旱每增加1 a，小麦、玉米、总粮食气象产量分别减少26.93 kg·hm^{-2}、21.52 kg·hm^{-2}、23.96 kg·hm^{-2}；伏旱每增加1 a，小麦、玉米、总粮食气象产量分别减少−1.49 kg·hm^{-2}、11.35 kg·hm^{-2}、0.44 kg·hm^{-2}。

由此可知，夏初旱对各气象产量的影响最为明显，主要是由于5—6月正值小麦、玉米等作物生长、发育、灌浆的时节，出现较重的夏初旱会对农作物影响严重，造成粮食减产，甚至绝收。另外，由于4月末至5月初正值玉米的种植、出苗期，出现少雨春旱使地面不易板结，对玉米种植、出苗较为有利，出现了春旱与玉米气象产量呈弱正相关性；再次，7—8月小麦已进入成熟、收获期，高温晴热的伏旱有利于小麦的收割、晾晒、入库，出现了伏旱与小麦气象产量呈弱正相关性。总之，干旱频数较多的年代气象产量偏低，干旱频数较少的年代气象产量偏高

由以上分析可知，武威市干旱发生的几率较高，对气象产量的起伏变化影响较大，特别是极端干旱天气会给农业生产带来较大的风险，因此，干旱是武威市制约粮食丰欠的重要因素之一。

3 讨 论

本研究得到的各级别干旱频数的变化与柏庆顺等[21]研究的中国西北地区各级别干旱频数的变化(轻旱＞中旱＞重旱＞特旱)完全不一致，这可能与表述干旱所用的气象要素和计算方法以及干旱等级的划分不同有关，有待于研究。但与任培贵等[22]分析的中国西北地区气象干旱呈增强趋势，曹丽君等[23]研究天山北坡是极端干旱事件的高发区域结论相对一致，同时与张乐园等[24]研究的中亚地区夏季和秋季大部分地区干旱趋势以加重为主的结论较为一致。

用降水量距平百分率指标作为气象干旱指标，资料容易获取，计算方便，但气象干旱的发生机理极其复杂，还会受到温度、蒸发、地形等自然因素的影响[25]。干旱对粮食产量的影响与作物布局、品种、生长状况等人为因素有很大的关系[26-28]，研究干旱对气象产量的影响对农业生产有一定实际意义[29-30]。在今后的工作中，还需要进一步掌握干旱的发生发展和变化规律，建立合适的干旱监测指标体系，及时准确地监测气象干旱，合理安排农业种植结构，采取科学防御措施，最大限度地确保粮食生产安全。

4 结 论

武威市春旱、夏初旱、伏旱频数的空间变化比较一致，均为北部荒漠区多于绿洲平原区，绿洲平原区多于南部山区。春旱、夏初旱和伏旱年代频数变化趋势不太一致，春旱频数凉州、民勤呈增加趋势，古浪、天祝及全市呈减少趋势；夏初旱频数凉州、古浪无变化，民勤、天祝及全市呈减少趋势；伏旱频数凉州无变化，民勤、古浪呈减少趋势，天祝及全市呈增加趋势。各类干旱频数随干旱等级的加重，总体上呈增加趋势，春旱、夏初旱中特旱频数最多，伏旱中特旱频数位居第二。武威市粮食产量随年和年代呈显著增加趋势，气象产量的年波动性较大，无明显的变化规律，气象产量随年代呈先增加再减少、然后再增加趋势。

武威市气象产量与各类干旱频数也基本表现为负相关(春旱与玉米、伏旱与小麦呈弱正相关)，气象产量与夏初旱频数相关系数通过了显著性水平检验，相关性显著，与其他干旱频数与气象产量的相关系数均未通过显著性水平检验，相关性不显著。干旱频数较多的年代气象产量偏低，干旱频数较少的年代气象产量偏高，说明干旱是制约粮食丰欠的重要因素之一。

参考文献(References)：

[1] 闫娜, 杜继稳, 李登科, 等. 干旱遥感监测方法研究应用进展[J]. 灾害学, 2008, 23(4): 117−121. [Yan Na, Du Jiwen, Li Dengke, et al. Application progress on drought monitoring by remote sensing [J]. Journal of Catastrophology, 2008, 23(4): 117−121.]

[2] 王富强, 霍风霖, 张功瑾. 我国农业干旱遥感监测方法研究进展 [J]. 水资源研究, 2013, 2(3): 206−212. [Wang Fuqiang, Huo Fenglin, Zhang Gongjin. Progress on agricultural drought monitoring by remote sensing in China[J]. Journal of Water Resources Research, 2013, 2(3): 206−212.]

[3] 程静, 陶建平. 全球气候变暖背景下农业干旱灾害与粮食安全——基于西南五省面板数据的实证研究[J]. 经济地理, 2010, 30(9): 1524−1528. [Cheng Jing, Tao Jianping. Agricultural drought disaster and food security under the background of global warming: Based on panel data of five provinces of southwest china[J]. Economic Geography, 2010, 30(9): 1524−1528.]

[4] 姚小英, 张强, 王劲松, 等. 甘肃冬小麦主产区40年干旱变化特征及影响风险评估[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 1−6,

32. [Yao Xiaoying, Zhang Qiang, Wang Jinsong, et al. Variation characteristics of drought and influence risk assessment for the main growing areas of winter wheat in Gansu Province during 40 yeas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(2): 1-6, 32.]

[5] 颜亮东, 李林, 李红梅. 青海省气象干旱对粮食产量的影响及其评估方法研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 687-691. [Yan Liangdong, Li Lin, Li Hongmei. The impact of drought on grain output in Qinghai Province and how to assess[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 687-691.]

[6] 王春乙. 重大农业气象灾害研究进展[M]. 北京: 气象出版, 2007: 1-29. [Wang Chunyi. Research Progress on Major Agricultural Meteorological Disasters[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007: 1-29.]

[7] 赵海燕, 张强, 高歌, 等. 中国1951—2007年农业干旱的特征分析[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(4): 201-206. [Zhao Haiyan, Zhang Qiang, Gao Ge, et al. Characteristic analysis of agricultural drought disaster in China during 1951-2007[J]. Journal of Natural Disaster, 2010, 19(4): 201-206.]

[8] 李吉顺, 王秀英. 我国农作物受旱面积的统计分析[J]. 中国减灾, 1996, 6(3): 28-31. [Li Jishun, Wang Xiuying. Statistical analysis of the drought area of crops in China[J]. Disaster Reduction in China, 1996, 6(3): 28-31.]

[9] 赵建军, 蒋远胜. 气候变化对我国农业受灾面积的影响分析——基于1951—2009年的数据分析[J]. 农业技术经济, 2011(3): 112-118. [Zhao Jianjun, Jiang Yuansheng. Analysis of climate change on agricultural affected area in China: Based on data analysis from 1951-2009[J]. Agricultural Technical Economy, 2011(3): 112-118.]

[10] 罗晓玲, 王润元, 齐月. 石羊河流域干旱特征及预测方法探讨[J]. 江西农业学报, 2017, 29(12): 107-114. [Luo Xiaoling, Wang Runyuan, Qi Yue. Study on drought characteristics and prediction method in Shiyang River Basin[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2017, 29(12): 107-114.]

[11] 成爱芳, 赵景波. 武威地区清代-民国时期干旱灾害特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(1): 98-103. [Cheng Aifang, Zhao Jingbo. Characteristics of Drought disasters in Wuwei region during the Qing Dynasty and the Republic of China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(1): 98-103.]

[12] 姚玉璧, 李耀辉, 石界, 等. 基于GIS的石羊河流域干旱灾害风险评估与区划[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 21-28. [Yao Yubi, Li Yaohui, Shi Jie, et al. Assessment and division of drought hazard risk in Shiyang River basin based on GIS[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(2): 21-28.]

[13] 罗晓玲, 胡丽莉, 杨梅. 近30年石羊河流域气象灾害特征及风险评估技术研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(32): 205-210. [Luo Xiaoling, Hu Lili, Yang Mei. Research on the characteristics of meteorological disasters and risk assessment technology in Shiyang River Basin in recent 30 years[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(32): 205-210.]

[14] 欧阳海, 郑步忠, 王雪娥, 等. 农业气候学[M]. 第一版. 北京: 气象出版社, 1990: 35-41. [Ouyang Hai, Zheng Buzhong, Wang Xue'e, et al. Agricultural Climatology[M]. 1st Ed. Beijing: Meteorological Press, 1990: 35-41.]

[15] 房世波. 分离趋势产量和气候产量的方法探讨[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(6): 13-18. [Fang Shibo. Exploration of method for discrimination between trend crop yield and climatic fluctuant yield[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(6): 13-18.]

[16] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 第二版. 北京: 气象出版社, 2007: 37-41. [Wei Fengying. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. 2nd Ed. Beijing: Meteorological Press, 2007: 37-41.]

[17] Livezey R E, Chen W Y. Statistical field significance and its determination by Monte Carlo techniques[J]. Monthly Weather Review, 1983, 111(1): 46-59.

[18] 张建勇, 高冉, 胡骏, 等. 灰色关联度和Pearson相关系数的应用比较[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2014, 30(11): 1-2. [Zhang Jianyong, Gao Ran, Hu Jun, et al. Apply comparison of gray correlation degree and Pearson correlation coefficient[J]. Journal of Chifeng University(Natural Science Edition), 2014, 30(11): 1-2.]

[19] 徐玉霞, 许小明, 杨宏伟, 等. 基于GIS的陕西省干旱灾害风险评估及区划[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 192-199. [Xu Yuxia, Xu Xiaoming, Yang Hongwei, et al. Assessment and regionalization of drought disaster risk in Shaanxi Province based on GIS[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(1): 192-199.]

[20] 刘静, 王连喜, 马力文, 等. 中国西北旱作小麦干旱灾害损失评估方法研究[J]. 中国农业科学, 2004, 37(2): 201-207. [Liu Jing, Wang Lianxi, Ma Liwen, et al. A loss estimation method of monitoring and estimating the yield loss of wheat by drought in dry farming areas in Northwest of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(2): 201-207.]

[21] 柏庆顺, 颜鹏程, 蔡迪花, 等. 近56 a中国西北地区不同强度干旱的年代际变化特征[J]. 干旱气象, 2019, 37(5): 722-728. [Bai Qingshun, Yan Pengcheng, Cai Dihua, et al. Inter-decadal change characteristics of different grades drought in northwest China in recent 56 years[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(5): 722-728.]

[22] 任培贵, 张勃, 张调风, 等. 基于SPEI的中国西北地区气象干旱变化趋势分析[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 182-187, 192. [Ren Peigui, Zhang Bo, Zhang Tiaofeng, et al. Trend analysis of meteorological drought change in Northwest China based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(1): 182-187, 192.]

[23] 曹丽君, 孙慧兰, 兰小丽, 等. 新疆天山极端干湿事件时空演变特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 188-197. [Cao Lijun, Sun Huilan, Lan Xiaoli, et al. Spatio-temporal evolution of the extreme dry and wet events in Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 188-197.]

[24] 张乐园, 王弋, 陈亚宁. 基于SPEI指数的中亚地区干旱时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 282-290. [Zhang Leyuan, Wang Yi, Chen Yaning. Spatio-temporal distribution characteristics of drought in Central Asia based on SPEI index[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 282-290.]

[25] 邹旭恺, 任国玉, 张强. 基于综合气象干旱指数的中国干旱变化

趋势研究[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 371−378. [Zou Xukai, Ren Guoyu, Zhang Qiang. Droughts variations in China based on a compound index of meteorological drought[J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(4): 371−378.]

[26] 尉迟文思, 苗恒录, 王星天, 等. 阴山北麓荒漠草原干旱气象因子分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1327−1334. [Yuchi Wensi, Miao Henglu, Wang Xingtian, et al. Analysis of meteorological factors affecting drought in a desert steppe of the northern foot of Yinshan Mountain[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1327−1334.]

[27] 童彦, 潘玉君, 朱海燕. 农业干旱灾害影响粮食产能安全的机理分析——以云南省为例[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(2): 502−522. [Tong Yan, Pan Yujun, Zhu Haiyan. Mechanism analysis of agricultural drought disaster encing food capacity safety: Take Yunnan Province as an example[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2011, 39(2): 502−522.]

[28] 何翠荣, 窦彩霞, 刘金付. 干旱灾害对粮食安全的影响及应对措施[J]. 现代农业科技, 2010(15): 332−333. [He Cuirong, Dou Caixia, Liu Jinfu. Impact of drought disasters on food security and countermeasures[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2010(15): 332−333.]

[29] 邓振镛, 王强, 张强, 等. 中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6278−6288. [Deng Zhenyong, Wang Qiang, Zhang Qiang, et al. Impact of climate warming and drying on food crops in northern China and the countermeasures[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(22): 6278−6288.]

[30] 丁声俊. 干旱灾害与粮食安全[J]. 中国食物与营养, 2009(4): 4−6. [Ding Shengjun. Drought disaster and food security[J]. Food and Nutrition in China, 2009(4): 4−6.]

Drought characteristics and effects on grain production in Wuwei, Gansu Province

DING Wenkui[1,2], LI Xingyu[1], YANG Xiaoling[1], MA Zhonghua[1], LI Yanying[1]

(1. Wuwei Meteorological Bureau of Gansu Province, Wuwei 733099, Gansu, China;
2. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, Gansu, China)

Abstract: Drought is a serious concern in the worst disaster weather in Wuwei, Gansu Province. Using precipitation data from 1960 to 2019 and grain yield data from 1970 to 2019 in Wuwei City of Gansu Province, variation characteristics of meteorological drought and grain yield, and the relationship between drought and grain yield was analyzed by statistical method in Wuwei City. The results showed that (1) spatial variation of frequency of spring drought, early summer drought and midsummer drought was consistent. Drought occurred more frequently in the northern desert area than in the oasis plain area, and that were more common in the oasis plain area than in the southern mountain area. (2) the frequency of spring drought, early summer drought and midsummer drought was not consistent. The frequency of spring drought increased in Liangzhou and Minqin, but showed a decreasing trend in Gulang, Tianzhu and the whole city. Eearly summer drought did not change in Liangzhou and Gulang, but decreased in Minqin, Tianzhu and the whole city. Midsummer droughts showed no change in Liangzhou, but decreased in Minqin and Gulang, and increased in Tianzhu and the whole city. Frequency of a variety of drought showed an increasing trend with increasing of drought grade. Extreme drought frequency was the most, and light drought took second place on spring drought. Extreme drought frequency was the most, and heavy drought took second place on early summer drought. Medium drought frequency was the most, extreme drought took second place on midsummer drought. (3) the grain production (wheat, maize, and total food) increased significantly with year and age. The annual variation of meteorological production had no obvious regularity, and had a great volatility. The age change of meteorological production increased first, then decreased and then increased. The meteorological yield was basically negatively correlated with ages frequency of various drought. The correlation between meteorological yield and frequency of early summer drought was significant, but the correlations with other droughts were not significant. Meteorological yields were lower in age of more drought frequencies, but meteorological yields were higher in age of less drought frequencies. It indicated that drought was one of the important factors restricting the abundance of grain.

Keywords: drought disaster; change characteristics; grain production; Wuwei City